

ポ リ マ ー 改 質 ア ス フ ァ ル ト の 技 術 の 進 歩 に つ い て

麻上 淳平*

本報文は、2023年1月24日に開催された第100回アスファルトゼミナールで報告した内容について、一部加筆修正して掲載します。

1. はじめに

日本の道路の総延長は120万kmを超え、経済の発展とともにその道路網を構築してきた。そのうちにおけるアスファルト舗装の占める割合は、90%以上と非常に高く、我が国の経済を今もなお支え続けている。アスファルト舗装の材料であるポリマー改質アスファルト（以下、PMA）においても、時代とともに変化する多様なニーズに対応すべく、数多くの技術開発がなされてきた。

第100回アスファルトゼミナールでは、「アスファルト舗装技術の変遷とこれから」というテーマのもと、従来の技術から今後の発展について各機関より紹介があった。当協会においても、「ポリマー改質アスファルトの技術の進歩について」と題し、PMAの歴史と年代ごとの課題、そして次の時代に求められる技術について事例を示しながら報告した。以下にその内容を紹介する。

2. PMAについて

2-1 PMAの概要

PMAの概要と混合物に付与する機能について図-1に示す。PMAは、ストレートアスファルト（以下、ストアス）に改質材を加え、性能を向上させたアスファルトである。改質材を加えることで、アスファルトの軟化点、接着力、粘度などが上昇する。この結果、PMAを使用することで、ストアスを使用した場合と比較して変形や骨材飛散の抑制効果、低温における脆さの改善といった様々な効果が付与され、舗装の耐久性を向上させることが可能となる。

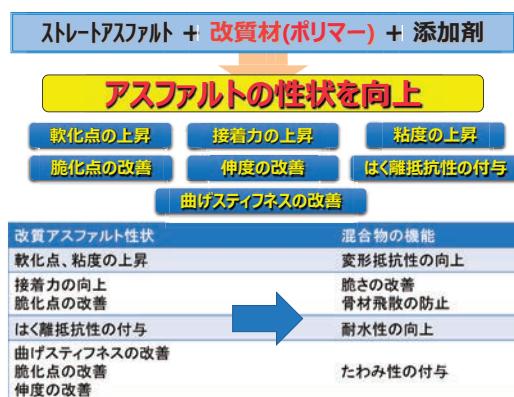


図-1 PMAの概要と混合物に付与する機能

2-2 PMAの代表的な改質材

現在、最も広く使用されている改質材にはSBS（スチレン-ブタジエン-スチレン共重合体）に代表されるような熱可塑性エラストマーがある。SBSの分子構造および、SBSの三次元構造の模式図を図-2と図-3にそれぞれ示す。SBSは剛直なポリスチレン鎖とパネのようなポリブタジエン鎖が規則正しく配列した構造である。この構造により、SBSはポリスチレンによる熱可塑性樹脂的な性質とポリスチレン、ポリブタジエンによるゴム弾性を併せ持つ。

アスファルト中のSBSは、熱可塑性樹脂的な性質により、混合物を製造・施工する温度領域において流動性を示す。これにより、施工性を確保できる。また、供用温度領域では、ポリスチレン部分が、高い凝集力によりドメインを形成することから、アスファルト混合物の塑性変形抵抗性が向上する。そしてポリスチレンドメイン同士をつなぐポリブタジエン鎖がパネのように働くこと

*あさがみ じゅんぺい 一般社団法人改質アスファルト協会 技術委員

で、ゴム弾性が発現し、ひび割れ抵抗性を向上させることができる。

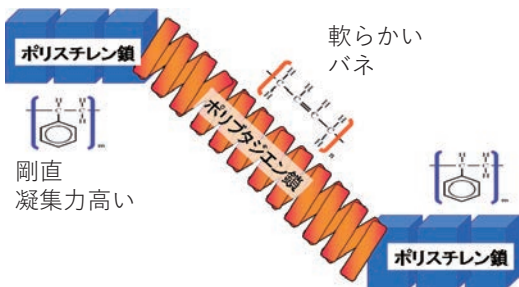


図-2 SBSの分子構造

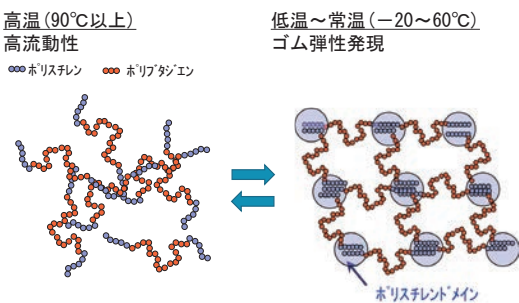


図-3 アスファルト中のSBSの三次元構造

2-3 PMAの種類と適用箇所について

PMAは舗装設計施工指針などによって規格化されており、表-1に示す基本的な7種類のグレードに大別される。また、適用箇所を表-2に示す。

改質Ⅰ型からⅢ型は、密粒系の舗装に適用され、数字が大きくなる程、軟化点や骨材把握力の指標であるタフネス・テナシティが大きくなる。これらの改質アスファルトは大型車交通量に応じて使い分けられる。また、より高軟化点である改質H型は、ポーラス混合物に使用さ

表-1 PMAの品質規格

項目	種類	Ⅰ型	Ⅱ型	Ⅲ型	Ⅳ型	H型
付加記号				-W	-WF	-F
軟化点	℃	50以上	58以上	70以上	80以上	—
伸び	7℃ cm	30以上	—	—	—	—
	15℃ cm	—	30以上	50以上	50以上	—
タフネス (25℃)	N・m	5.0以上	8.0以上	16以上	20以上	—
テナシティ (25℃)	N・m	2.5以上	4.0以上	—	—	—
骨格材のばく離率	%	—	—	5以下	—	—
フラックス量	℃	—	—	—	-12以下	-12以下
曲げ仕事量 (-20℃)	kPa	—	—	—	—	400以上
曲げ仕事量 (-20℃)	kPa	—	—	—	—	100以下
針入度 (25℃)	1/10mm	—	—	40以上	—	—
増質	質量増化率 %	—	—	0.6以下	—	—
加熱後	針入度増化率 %	—	—	65以上	—	—
引火点	℃	—	—	280以上	—	—
密度	g/cm³	—	—	試験表に記載	—	—
最適混合温度	℃	—	—	試験表に記載	—	—
最適締固め温度	℃	—	—	試験表に記載	—	—

表-2 PMAの適用箇所

種類	付加記号	Ⅰ型	Ⅱ型	Ⅲ型	-W	-WF	H型	-F
混合物機能	適用混合物	密粒系、細粒系、粗粒系等の混合物に用いる。Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型は、主にポリマーの添加量が異なる。						
主な適用箇所	一般的な箇所	◎						
塑性変形抵抗性	大型車交通量が多い箇所 大型車交通量が著しく多い箇所及び交差点		◎				◎	◎
摩耗抵抗性	積雪寒冷地域	◎	◎	◎	◎	◎		
骨材飛散抵抗性							◎	◎
耐水性	積雪（コールド床版）		◎	◎	◎			
たわみ追従性	積雪（積床版） たわみ小 たわみ大		◎	◎		◎		
排水性（透水性）							◎	◎

W：耐水性、F：可とう性、◎：適用性高い、○：適用可能、空欄：要検討

れている。W、Fといった付与記号は、それぞれ耐水性、可とう性を意味する。例えば、Ⅲ型-Wは高い流動変形抵抗性と耐水性を有するため、主にコンクリート床版上の橋面舗装に適用される。

2-4 PMAの出荷量

PMAの出荷量の推移を図-4に示す。PMAの出荷量は直近10年において、40万トン程度で推移している。一方で、アスファルト混合物全出荷量に対するPMAを使用した混合物の比率を見ると、当該比率は増加し続け、約20%にまで達している。

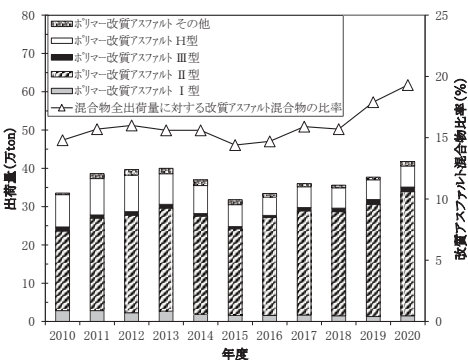


図-4 PMAの出荷量の推移

3. 日本におけるPMAの歴史と発展

3-1 概要

文献^{1), 2), 3), 4), 5)}を元に日本におけるPMAの歴史を簡易的に示したものを表-3に示す。当協会では現在のところ、使用材料や要求性能の観点からPMAの歴史を6期に大別して整理している。さらに、年代ごとの改質材の変遷を図-5に示す。

表-3 日本のPMAの歴史

第Ⅰ期 1950～	小規模試験施工
第Ⅱ期 1960～	積雪寒冷地での試験舗装
第Ⅲ期 1967～	建設省（現国土交通省）と北海道開発局による本格的試験施工
第Ⅳ期 1978～	改質アスファルトの標準化と普及
第Ⅴ期 1992～	多様化する需要への対応
第Ⅵ期 2010～現在	環境配慮型アスファルトへの取り組み

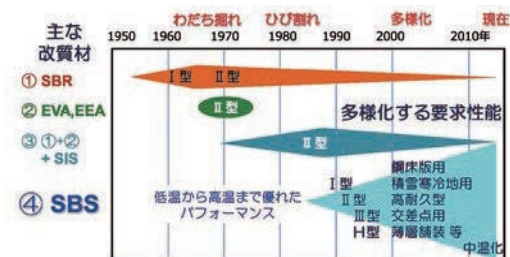


図-5 改質材の変遷

3-2 各年代における取組み

3-2-1 第Ⅰ期 小規模試験施工

第Ⅰ期における主な出来事を表-4に示す。

表-4 第Ⅰ期の年表

1897年	フランスでゴム添加の試み
1947年	米国で合成ゴムラテックス入りアスファルトを試験施工、日本道路協会設立、日本アスファルト乳剤協会設立
1952年	東京都で天然ゴム粉末を試用、神戸で屑ゴムを試用、北海道開発局にて天然ゴム粉末を使用して試験舗装
1954年	北海道大学でゴム入りアスファルト混合物の本格的な研究を開始

PMAはフランスでアスファルトにゴムを添加する試みが行われたのが始まりといわれており、その後1950年代に日本に導入された。この時期は未発達な舗装技術に由来する舗装の荒れやひび割れに対応したアスファルトの開発が課題であった。

東京都、神戸市での試みを皮切りに、1955年には北海道大学で本格的な研究が開始された。

改質材としては天然ゴムも用いられたものの、コストや技術的な問題から、屑ゴムが主体であった。

3-2-2 第Ⅱ期 積雪寒冷地での試験舗装

第Ⅱ期における主な出来事を表-5に示す。

表-5 第Ⅱ期の年表

1960年	天然ゴム入りアスファルトの市販開始、メーカー規格制定
1961年	アスファルト舗装要綱発刊
1962年	国際合成ゴム生産者協会（IISRP）がゴム入りアスファルト舗装の積極的研究開始
1966年	北海道開発局が輸入SBRラテックスを使用して国道36号線で試験施工を実施 アスファルト改質用国産SBRラテックスの市販を開始

1960年代に入ると、SBR（スチレン-ブタジエンゴム）や天然ゴムを使用した試験舗装が実施されるようになった。この時期は積雪寒冷地においてタイヤチェーンによる摩耗に対応したアスファルトが開発された。

この時期に登場した改質材であるSBRは早々に国産品が市販されるようになり、現在においても多く使用されている。SBRはSBSと同様にポリスチレン骨格とポリブタジエン骨格からなるポリマーではあるものの、SBSとは異なり、ポリスチレンとポリブタジエンがランダムに配列された構造を有している。そのため、ドメインを形成しづらく、常温～高温においてもソフトなゴム弾性を有している。

3-2-3 第Ⅲ期 建設省と北海道開発局による本格的試験施工

第Ⅲ期における主な出来事を表-6に示す。

表-6 第Ⅲ期の年表

1967年	北海道開発局が国産SBRラテックスを使用したプラントミックス混合物の製造方法の実用化アスファルト舗装要綱改訂（ゴム入りアスファルトが特殊材料として記述）
1968年	ゴムアスファルト研究会発足
1969年	東名高速道路でゴム入りアスファルトを使用
1970年	初のゴムアスファルト舗装国際会議が開催
1971年	樹脂系アスファルト改質材の市販が開始 北海道開発局がゴム入りアスファルトの使用を認定、東京都がゴム入りアスファルトの大規模試験舗装を開始
1975年	アスファルト舗装要綱改訂

1960年代の後半には、PMAの効用が広く認められ

本格的な試験施工が実施されるようになった。この時期は、舗装のひび割れ対策としてアスファルト量を増したこと、高度経済成長によって大型車の交通量が急激に増加したこと等の理由により、わだち掘れが課題となっていた。そこで改質材として、新たに「硬さ」と「韌性」を併せ持ったEVA（エチレン酢酸ビニル共重合体）やEEA（エチレンエチルアクリレート共重合体）等の熱可塑性樹脂が注目を集めた。

3-2-4 第Ⅳ期 改質アスファルトの標準化と普及

第Ⅳ期における主な出来事を表-7に示す。

表-7 第Ⅳ期の年表

1975年	ゴムアスファルト懇話会発足 アスファルト舗装要綱改訂（ゴム入りアスファルトの標準的性状が設定）
1979年	ゴムアスファルト懇話会の名称を日本ゴムアスファルト協会に変更
1981年	建設省土木研究所、東京都土木センター、日本ゴムアスファルト協会が共同研究を開始
1983年	上記共同研究の成果としてゴム入りアスファルト「筑波1号」を発表
1984年	「筑波1号」を土木研究所構内で試験施工
1986年	「筑波1号」の現場試験施工18か所実施 アスファルト舗装要綱改訂
1987年	排水性舗装が低騒音を目的に東京都環状線で施工
1988年	アスファルト舗装要綱改訂 （改質アスファルトが一般材料とされる規格は現在とは異なり、材料によってグレード分けされていた）

1970年代後半から1980年代は改質アスファルトの標準化と普及が進んだ年代である。このころになると、舗装の要求性能も高度化し流動、摩耗、ひび割れのすべてを対策したアスファルトが求められるようになった。1978年に改訂された「アスファルト舗装要綱」では、ゴム入りアスファルトの標準的性状が設定された。その後、1983年には建設省（現国土交通省）土木研究所、東京都土木研究センター、そして当協会の前身にあたる日本ゴムアスファルト協会の官民の共同研究により、プレミックスタイプのゴム入りアスファルト「筑波1号」が開発された。

「筑波1号」は数多くの試験施工を実施後、供用性調査

が行われ、その後のPMAの研究に大きな功績を残した。また、1988年にはアスファルト要綱改訂で改質アスファルトが一般材料として記載された。

さらに、新たなアスファルト舗装として、ポーラスアスファルト混合物を使用した排水性舗装が登場した。ポーラスアスファルト混合物には、現行のH型にあたる高粘度改質アスファルトが開発・適用された。

改質材としては熱可塑性エラストマーであるSIS（スチレン-イソプレン-スチレン共重合体）が使用され始めた。

3-2-5 第Ⅴ期 多様化する需要への対応

第Ⅴ期における主な出来事を表-8に示す。

表-8 第Ⅴ期の年表

1992年	日本ゴムアスファルト協会から日本改質アスファルト協会へ名称変更 アスファルト舗装要綱改訂 （現行のI型とII型の規格が掲載された）
1996年	排水性舗装技術指針（案）の発行 （高粘度改質アスファルトの使用を推奨） 日本道路公団の設計要領において、高機能舗装が新規に加わり、高粘度改質アスファルトの使用を原則とする
2001年	舗装設計施工指針の発行 超重交通用（現行Ⅲ型）、付着性改善型（現行Ⅲ型-W）、高粘度（現行H型）の標準的性状を記載
2006年	舗装設計施工指針の改定 改質アスファルトの名称変更

第Ⅴ期は1990年代に入り、時代が進むにつれ、要求性能は多様化し、需要に応じたアスファルトが求められるようになった。この時代の主な出来事としては、1992年に当協会の前身である日本ゴムアスファルト協会から現在の日本改質アスファルト協会になったことがあげられる。また、第Ⅳ期の終わりに登場した排水性舗装はその有効性が認められ、技術指針（案）が発行されました。この技術指針案において、現行の改質H型である高粘度改質アスファルトの標準的性状が設定された。さらに、2001年、舗装設計技術指針においても、超重交通用改質アスファルト（現行改質Ⅲ型）、付着性改善型改質アスファルト（現行改質Ⅲ型-W）、高粘度改質アスファルト（現行改質H型）が記載され、より一般的な材料として定着した。

改質材としては熱安定性、低温性状といった点でバランスの取れたSBSが登場し、現在でも広く使用されている。

また、改質H型については、ねじれ作用のかかる箇所や極寒冷地の骨材飛散抑制といった多種多様な需要に対応すべく、特殊グレードが整備された。改質H型の特殊グレードの適用表を表-9に示す。たわみやすい鋼床版上の橋面舗装に対応したグレードやより空隙率の高い小粒径ポーラスアスファルト混合物に対応したグレードも存在し、使用されている。

表-9 ポーラス用特殊グレード適用表

混合物機能	主な適用もしくは箇所	特殊グレード			
		高耐久型	寒冷地・高耐久型	ねじれ抵抗性改質型	鋼床版用
塑性変形抵抗性	一般的な箇所	●	●	●	●
	大型車交通量が著しく多い箇所	●	○	●	○
	寒冷地の骨材飛散抑制	○	●		○
骨材飛散抵抗性	極寒冷地の骨材飛散抑制		●		
	交差点部の骨材飛散抑制	○	○	●	
	疲労破壊抵抗性	○	○		●
騒音低減、排水性(透水性)	高空隙率な小粒径混合物	●	●		

3-2-6 第Ⅵ期 環境配慮型アスファルトへの取組み

第Ⅵ期の主な出来事を表-10に示す。第Ⅵ期では、2000年代から現在までの取組みについて紹介する。

表-10 第Ⅵ期の年表

2005年	再生アスファルト混合物の割合が混合物全体の出荷量の7割を超えるようになる
2010年	グリーン購入法に基づく特定調達品目に「中温化アスファルト混合物」が指定
2012年	道路建設業協会「中温化(低炭素)アスファルト舗装の手引き」発行
2015年	国連において「持続可能な開発目標(SDGs)採択
2020年	カーボンニュートラル宣言(2050年までに)

2000年代に入ると、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスによる地球温暖化の問題がクローズアップされるようになった。2015年には国連において、「持続可能な開発目標(SDGs)」が採択され、日本においても、2050年までに温室効果ガスの排出を差し引きゼロにするカーボンニュートラルを目指すことを宣言している。

そのため、環境に配慮したアスファルト混合物の製造技術の導入が随所で求められている。PMAに関しては、主に「中温化技術」「再生改質技術」についてはすでに研究が進んでいる。以下にこれらの技術を紹介する。

(a) 中温化技術

中温化技術は、製造および施工時の温度を低減できるアスファルトを用いた技術のことである。主に製造時の使用燃料の削減によりCO₂の排出を抑制できるほか、混合物製造時のアスファルトの劣化抑制、早期交通解放時の初期わだち掘れの抑制により、供用期間の延長にも寄与する可能性がある。

製造時における重油消費量から、中温化によるCO₂削減率が計算されている(図-6参照)⁶⁾。製造温度を改質Ⅱ型混合物は180℃、中温化Ⅱ型混合物は150℃と仮定すると、中温化Ⅱ型の使用により約13%のCO₂削減効果が得られる。

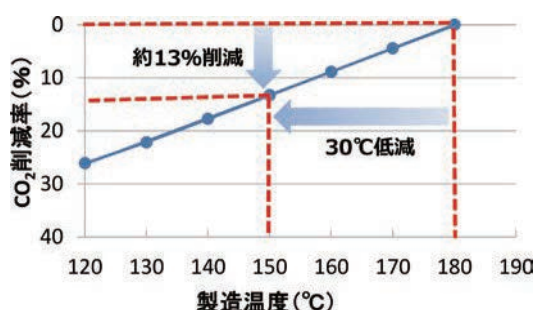


図-6 中温化技術によるCO₂削減効果

(b) 再生改質技術

再生技術とは、アスファルト混合物に既設アスファルト舗装の撤去材である再生骨材を混入させることで、新規で使用するアスファルト量を減らし、CO₂排出量を削減する技術のことである。

再生後の混合物が改質アスファルトを使用した混合物の場合を特に再生改質技術と呼ぶ。

従来のストアスを用いた再生アスファルト混合物は、旧アスファルトの針入度を回復させるために再生用添加剤と新規のストアスを混合する場合が多い。一方で、再生改質アスファルト混合物には図-7に示すような二通りの製造方法が存在する。一つは、ストアスまたは改質アスファルトを新規アスファルトとし、再生用添加剤、

および必要であれば改質材を混合時にプラントミックスで加えて製造する。もう一つは、特殊なPMAである再生ポリマー改質アスファルトⅡ型(以下、再生Ⅱ型)を使用する。再生Ⅱ型は再生に必要な成分をプレミックスで混合しているため、プラントミックスの場合と比較すると、ムラやばらつきの少ない安定した混合が実現できると考えられる。

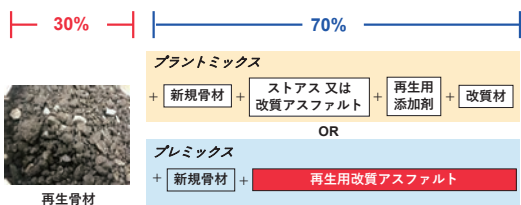


図-7 再生改質アスファルト混合物の製造方法

ここに一般的な改質Ⅱ型と、中温化Ⅱ型、再生Ⅱ型を使用した場合におけるCO₂の排出量の比較の結果を図-8に示す⁶⁾。CO₂排出量は中温化技術により5.7%、再生改質技術により11.9%の削減が可能である。

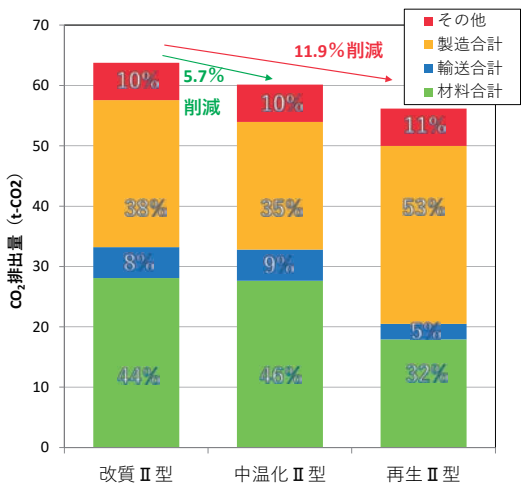


図-8 中温化および再生改質によるCO₂削減効果

3-3 今後に向けた新しい技術

今後、カーボンニュートラルに向けた動きはさらに加速することが予想される。そこでこれからのアスファルト舗装に貢献できる技術として、検討されているものをいくつか紹介する。

(ア) 中温化再生改質技術

中温化再生改質技術は、先に登場した中温化技術と再生改質技術の組み合わせである。一般的な改質Ⅱ型と中温化再生改質Ⅱ型のCO₂排出量の比較を図-9に示す⁶⁾。再生骨材を使用し、中温化することでCO₂を18.1%削減が可能であると考えられる。

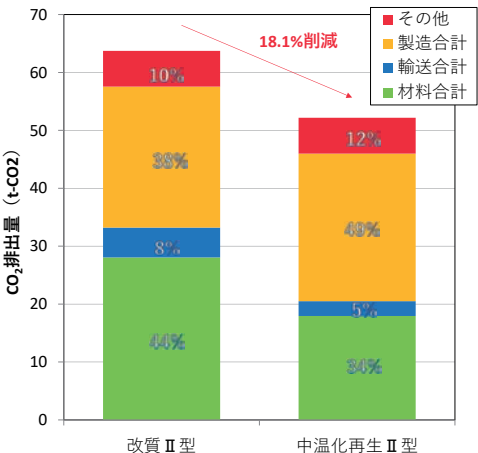


図-9 中温化再生によるCO₂削減効果

(イ) 植物系改質材の利用

アスファルトやSBS、合成ゴムは石油由来であり、再生技術は進歩しているものの、完全な再生には至っていない。そこで循環資源である植物系樹脂を改質材に使用する検討がなされている⁷⁾。

改質材として熱可塑性樹脂の植物系改質材を利用した改質アスファルトの一例を以下に示す。この改質アスファルト(以下、植物系改質アスファルト)は、改質Ⅱ型に対し、植物系改質材を20%置換して製造している。植物系改質アスファルトの代表性状を表-11に示す。植物系改質材は常温において硬質であるため、改質Ⅱ型と比較して針入度が低くなっている。また、軟化点が高いことから、流動変形に対する抵抗性が期待される。

表-11 植物系改質アスファルトの性状

項目		植物系改質アスファルト	改質Ⅱ型
軟化点	℃	75.5	61.0
伸度(15℃)	cm	54	70
針入度(25℃)	1/10mm	35	50
タフネス(25℃)	N・m	25.1	22.5

実際にホイールトラッキング試験により、植物系改質アスファルトと種々の混合物とで動的安定度を算出・比較した結果を図-10に示す。植物系改質アスファルトの耐流動性は非常に高く、エポキシアスファルトや半たわみ性舗装に匹敵する結果となった。

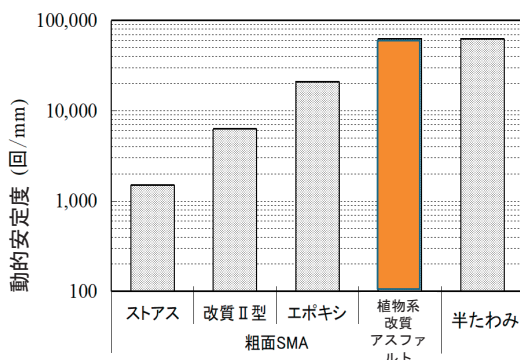


図-10 ホイールトラッキング試験結果

また、植物系改質材はこれまでのSBS等には付与できない耐油性のような特性をアスファルトに付与することができるとも報告されている。

耐油性の試験状況を図-11に示す。一般的な改質Ⅱ型では、灯油散布後にフォークリフトですえきった際、舗装が激しく損傷しているのに対し、植物系改質アスファルトを使用した場合には健全性を保っていることがわかる。



図-11 耐油性試験状況

このように、植物系改質材を利用することでカーボンニュートラルに貢献できるだけでなく、一般的なPMAでは適用が困難な箇所へ使用できる可能性がある。

4. おわりに

本報では、PMAの技術について、時代背景を追いつながら紹介した。

最後に紹介した環境負荷低減に資するアスファルトに関する技術は、今後益々重要性が増すと考えられる。これらの技術が2050年カーボンニュートラルの実現に向けた一助となることを期待する。

当協会ではポリマー改質アスファルトに関する技術の向上、品質の安定化などを通して社会貢献に努め、今後も、国民の皆様に満足される道路舗装構築の一翼を担うべく、ポリマー改質アスファルトの開発・安定供給に努力するとともに、多様なニーズに応える活発な活動を継続していく所存である。

参考文献

- 1) 栗谷川：改質アスファルトと舗装技術，改質アスファルト，第6号，pp.8-15，1995.
- 2) 塩尻：改質アスファルトの需要/流通状況等について，改質アスファルト，第19号，pp.19-32，2002.
- 3) 改質アスファルト技術基準の変遷，改質アスファルト，第3号，pp.19-21，1994.
- 4) ポリマー改質アスファルトの歴史，改質アスファルト，第50号，pp.10-11，2018.
- 5) 深代：ポリマー改質アスファルトの変遷と標準的性状の変更を踏まえた今後の展開について，舗装，42巻，pp.21-26，2007.
- 6) 鷹本：脱炭素社会に寄与するポリマー改質アスファルトについて，改質アスファルト，第59号，pp.10-15，2022.
- 7) 曲ら：再生可能資源を利用した舗装材料の開発と実用例，アスファルト，Vol.164，No.237，pp.25，2021.